

**СЕЙЕД МОДЖТАБА ДЖАФАРИ ХЕНДЖАНИ**, аспирант НТУ «ХПИ»,  
**В. П. СЕВЕРИН**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ АЭС**

У статті представлені модифікації генетичних алгоритмів у якості прямих методів глобальної оптимізації для оптимізації векторних цільових функцій. Розроблена й оптимізована математична модель для слідуючого привода парової турбіни у просторі станів з трьома датчиками. Розроблені моделі автоматизованих систем управління частотою обертання ротора парової турбіни у просторі станів з різноманітними стандартними та інтелектуальними регуляторами. Параметри регуляторів оптимізовані для систем стабілізації частоти обертання.

В статье представлены модификации генетических алгоритмов в качестве прямых методов глобальной оптимизации для оптимизации векторных целевых функций. Разработана и оптимизирована математическая модель для следящего привода паровой турбины в пространстве состояний с тремя датчиками. Разработаны модели автоматизированных систем управления частотой вращения ротора паровой турбины в пространстве состояний с различными стандартными и интеллектуальными регуляторами. Параметры регуляторов оптимизированы для систем стабилизации частоты вращения.

Genetic algorithms modifications as global optimization direct methods are developed for vector objective functions optimization. The mathematical model for steam turbine watching drive in state space with three sensors is developed and optimized. The models of automatic control systems for steam turbine rotor rotation frequency are developed in state space with the different standart and intelligent regulators. For the rotation frequency stabilizing systems are optimized regulators parameters.

**Введение.** Одной из основных инженерных проблем создания систем автоматического управления (САУ) паровыми турбинами является проблема оптимизации их показателей качества [1]. Применяющиеся инженерные методы расчета систем управления обычно основаны на существенном упрощении моделей и применении приближенных косвенных скалярных критериев качества. Самым большим недостатком расчетов систем управления турбинами атомных электростанций является то, что в этой области мало применяются модели с оптимальными интеллектуальными регуляторами. Интеллектуальные регуляторы, основанные на нечеткой логике и искусственных нейронных сетях, позволяют решать более сложные задачи управления сложными объектами, чем стандартные регуляторы.

В последние годы интенсивно ведутся работы по практическому внедрению нечетких регуляторов (НР), нечетких экспертных систем и систем управления в промышленную и непромышленную сферы [2]. При этом по качеству переходных процессов и достижению целей управления НР превосходят традиционные ПИД-регуляторы.

Использование интеллектуальных регуляторов приводит к нелинейным неявно заданным моделям САУ. Для оптимального синтеза параметров таких систем с учетом многоэкстремальности их показателей качества целесообразно использовать методы глобальной оптимизации, в частности, методы прямого поиска и генетические алгоритмы (ГА) [3–6]. Эти методы, обычно применяющиеся для оптимизации скалярных целевых функций, необходимо модифицировать для оптимизации векторных целевых функций, учитывающих все требования к САУ [7–9].

Целью данной статьи является разработка моделей систем стабилизации частоты вращения паровой турбины К-1000-1500/60 и ее следящего привода в пространстве состояний с использованием стандартных и НР, а также анализ возможностей оптимизации показателей качества систем стабилизации частоты ГА. Достижение этой цели позволит сделать САУ паровыми турбинами еще эффективнее с учетом всех предъявляемых к ним конструктивных и технологических требований.

**Возможности ГА и их модификация для оптимального синтеза систем управления.** Предыдущий опыт исследования САУ с линейными регуляторами показал, что критерии оптимизации, как правило, являются одноэкстремальными. Однако для сложных многоконтурных систем управления и систем управления с интеллектуальными регуляторами характерно наряду с глобальным наличие большого числа локальных экстремумов. Локальные экстремумы появляются и при введении ограничений на пространство поиска.

Для решения одноэкстремальных задач оптимизации существует достаточное число алгоритмов градиентных методов и методов прямого поиска. Одним из самых эффективных методов прямого поиска является метод деформируемого многогранника Нелдера-Мида [3].

Применение метода Нелдера-Мида для оптимизации САУ с НР различной структуры не приводит к оптимальному решению. В каждом случае результаты зависят от выбранных координат начальной точки поиска. Из этого следует вывод о многоэкстремальности целевых функций подобных задач, и для их решения требуются методы глобальной оптимизации [4].

В настоящее время наиболее предпочтительными методами многоэкстремальной оптимизации являются ГА, реализующие постулаты теории эволюции и опыта селекции растений и животных [5].

Цель оптимизации систем управления с помощью ГА состоит в том, чтобы найти наилучшее возможное решение задачи оптимизации по одному или нескольким критериям. Чтобы реализовать ГА нужно сначала выбрать подходящую структуру для представления этих решений. В постановке задачи поиска, экземпляр этой структуры данных представляет точку в пространстве поиска всех возможных решений. Чтобы оптимизировать структуру, используя ГА, нужно задать некоторую меру качества для каждой структуры в пространстве поиска. Для этой цели используется функция

приспособленности. При максимизации целевой функции часто она сама выступает в качестве функции приспособленности. Для задач минимизации, целевую функцию следует инвертировать и сместить затем в область положительных значений [11]. Стратегия поиска оптимального решения в ГА опирается на гипотезу селекции: чем выше приспособленность особи, тем выше вероятность того, что у потомков, полученных с её участием, признаки, определяющие приспособленность, будут выражены ещё сильнее [6].

Если принять, что каждая особь популяции является точкой в координатном пространстве оптимизационной задачи  $X_i[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ , а приспособленность особи соответствующим значением функции цели  $f(X_i)$ , то популяцию особей можно рассматривать как множество координатных точек в пространстве, а процесс эволюции — как движение этих точек в сторону улучшения значений целевой функции.

Следует отметить, что классический ГА находит глобальный экстремум в вероятностном смысле и эта вероятность зависит от числа особей в популяции. Как показали исследования, при оптимизации сложных многоконтурных и многосвязных систем управления с ПИД-регуляторами и аналогичных систем с интеллектуальными регуляторами ГА с достаточно высокой вероятностью находят глобальный экстремум. В частности, этот факт установлен для диплоидной версии ГА. Однако вычисление целевой функции, связанной с показателями качества системы управления на интервале времени переходного процесса в системе, требует значительных вычислительных ресурсов, что существенно сказывается на общем времени работы ГА.

Особенностью ГА как метода глобального поиска является то, что ни один из ГА (кроссингвер, мутация, инверсия) в процессе генерирования потомков не опирается на знание локального рельефа поверхности отклика для функции цели. Формирование потомков генетическими операторами происходит случайным образом, и поэтому нет гарантии, что найденные решения будут лучше родительских. Следовательно, в процессе эволюции встречается достаточно большое число «неудачных» потомков, которые увеличивают число обращений к функции цели и увеличивают, тем самым, время поиска глобального экстремума.

Кроме того, ГА находят оптимальное решение только внутри заданного диапазона поиска. Поэтому диапазоны поиска и число особей в популяции приходится задавать с большим запасом, что также увеличивает время решения.

Перечисленные особенности сдерживают широкое применение ГА в инженерной практике. Однако потребность в таких алгоритмах для решения прикладных задач сравнительно небольшой размерности постоянно растет, особенно в связи с намечающейся тенденцией внедрения в системы управления нечетких и нейросетевых технологий.

Для оптимального синтеза САУ целесообразно использовать векторные целевые функции, учитывающие весь комплекс требований к системе в порядке их предпочтения [9]. Поскольку ГА в основном используются для оптимизации скалярных целевых функций, то для оптимизации векторных целевых функций эти алгоритмы модифицированы с использованием операций сравнения значений векторной функции [9].

**Моделирование и оптимизация следящего привода.** Электрогидравлический следящий привод является основным исполнительным звеном САУ частотой вращения паровых турбин (САУЧ). Разработаем математическую модель следящего привода, предназначенную для оптимизации его показателей качества.

Принципиальная схема электрогидравлического следящего привода на рис. 1 включает электрогидравлический преобразователь (ЭГП), отсечной золотник (ОЗ), сервомотор (СМ), датчики положения (ДП), электронную часть (ЭЧ). По ихним моделям получены модели схем привода с различным числом датчиков.

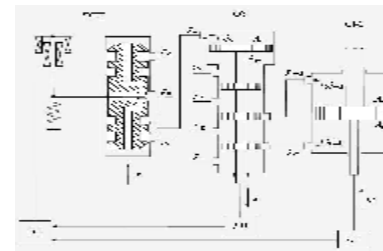


Рис. 1. Принципиальная схема следящего привода

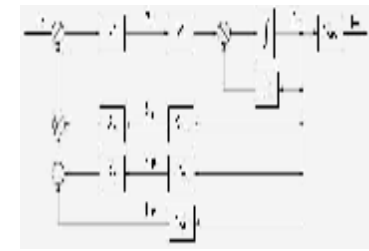


Рис. 2. Структурная схема следящего привода с тремя датчиками

Структурная схема следящего привода с тремя датчиками представлена на рис. 2. Схема включает сумматоры, пропорциональное звено с коэффициентом  $K$ , модель последовательного соединения ЭГП, ОЗ и СМ, датчик положения золотника ЭГП, датчик положения ОЗ, датчик положения СМ, три отрицательные обратные связи (ООС) по положению золотника ЭГП, ОЗ и СМ с коэффициентами  $k_y$ ,  $k_s$  и 1. На вход ЭГП поступает сигнал

$$\xi_u = K(\mu_s - k_y \xi_p - k_s \sigma_p - \mu_p).$$

Для надёжности САУЧ следящий привод должен иметь значительный запас устойчивости, быть чувствительным по отношению к управляющим сигналам и быстродействующим. Рассмотрим оптимизацию показателей качества следящего привода модифицированными ГА.

Таблица 1

Для оптимизации привода сформируем вектор из его переменных параметров  $x = (K, k_y, k_s)$ . Наложим на значения варьируемых параметров ограничения  $a_i \leq x_i \leq b_i$ ,  $a_i = 0$ ,  $b_i = 100$ ,  $i = \overline{1, p}$  и сформируем для них штрафную функцию

$$S(x) = \sum_{i=1}^p [\max\{0, a_i - x_i\} + \max\{0, x_i - b_i\}].$$

По штрафной функции ограничений  $S(x)$ , штрафной функции необходимых условий устойчивости  $P(x)$ , коэффициентам первого столбца таблицы Рауса  $\rho_k(x)$ ,  $k = \overline{2, n-1}$ , максимальному отклонению  $\sigma(x)$ , показателю колебательности  $\zeta(x)$ , предельным значениям отклонения и показателя колебательности  $\sigma_m$  и  $\zeta_m$ , времени регулирования  $\tau(x)$  и областям уровней  $H_k$ ,  $k = \overline{0, n+2}$  сформируем учитывающую все ограничения на параметры системы векторную целевую функцию

$$F(x) = \begin{cases} (0; S(x)), & x \in H_0, \\ (1; P(x)), & x \in H_1, \\ (k; -\rho_k(x)), & x \in H_k, k = \overline{2, n-1}, \\ (n; \sigma(x) - \sigma_m), & x \in H_n, \\ (n+1; \zeta(x) - \zeta_m), & x \in H_{n+1}, \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+2}. \end{cases}$$

Первая проекция — функция уровня соответствует числу выполненных ограничений, а вторая проекция функция штрафа определяет штраф нарушения ограничения [9]. Эта функция в приоритетном порядке учитывает непосредственные ограничения на параметры системы, необходимые и достаточные условия устойчивости, ограничения прямых показателей качества, требование минимальности для времени регулирования системы управления. Для оптимизации этой векторной целевой функции были модифицированы ГА с использованием операций сравнения значений векторной функции [9]. Результаты оптимизации привода с применяемыми критериями качества — улучшенной интегральной квадратичной оценки и прямых показателей качества представлены в таблице 1. Для номера вычислительных экспериментов  $N$  приведены найденные модифицированным ГА оптимальные значения варьируемых параметров  $K^*$ ,  $k_y^*$ ,  $k_s^*$  и время регулирования  $t_c^*$ .

Результаты оптимизации следящего привода

$N$	$K^*$	$k_y^*$	$k_s^*$	$t_c^*, c$
1	2,6	0,45	0,75	0,080
2	1,8	0,60	0,90	0,112
3	0,7	0,68	1,26	0,161
4	2,4	0,44	0,77	0,082
5	3,0	0,46	0,69	0,076
6	1,5	0,57	0,98	0,118
7	2,6	0,45	0,75	0,080
8	1,8	0,60	0,90	0,112

Эти результаты, полученные ГА, подтвердили результаты, ранее полученные другими методами оптимизации.

Для  $N = 6$ , изменения переменных состояния оптимального следящего привода, полученные при входном ступенчатом воздействии  $\mu_s = 1(t)$  показали, что все процессы плавные и быстро устанавливаются без существенных колебаний [10]. Координаты тока  $\xi_i$ , перемещения управляющей катушки  $\xi(x)$  и золотника ЭГП  $\xi_y$  из нулевых начальных значений сначала увеличиваются, затем уменьшаются, меняют знак и стремятся к нулевым конечным значениям. Координаты напряжения  $\xi_u$ , ОЗ  $\sigma_s$  и СМ  $\mu_m$  положительны,  $\xi_u$  и  $\sigma_s$  стремятся к нулевым конечным значениям, а  $\mu_m$  — стремится к 1.

Таким образом, оптимизация показателей качества следящего привода позволила обеспечить высокое качество протекающих в нем процессов.

**Моделирование и оптимизация систем управления паровой турбиной.** Рассмотрим построение математических моделей САУ паровой турбиной К-1000-60/1500 в пространстве состояний.

Принципиальная схема паровой турбины представлена на рис. 3 и включает клапан регулирования турбины (КРТ), цилиндр высокого давления (ЦВД), объем перед ЦВД, объем в сепараторе-перегревателе, клапан сепаратора-перегревателя (КСП), объем за клапаном сепаратора-перегревателя, цилиндр среднего давления (ЦСД), цилиндр низкого давления (ЦНД), объем перед ЦНД.

На основании системы дифференциальных уравнений следящего привода, парового тракта и ротора паровой турбины получена математическая модель турбины как объекта управления [9]. САУЧ предназначена для стабилизации частоты вращения ротора паровой турбины. Самым тяжелым испытанием САУЧ является сброс номинальной нагрузки паровой турбины и переход к режиму холостого хода. По разработанной

модели паровой турбины К-1000-60/1500 построим модели САУЧ для сброса нагрузки при различных законах управления с различными регуляторами.

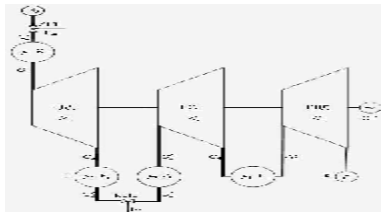


Рис. 3. Принципиальная схема паровой турбины К-1000-60/1500

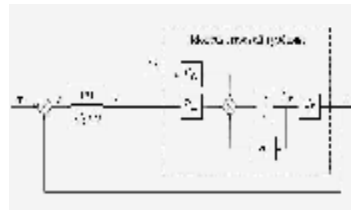


Рис. 4. Структурная схема САУЧ частотой вращения

Структурная схема предложенной модели реальной САУЧ представлена на рис. 4 и включает сумматор, регулятор частоты, модель паровой турбины и ООС [7]. Сигнал ошибки подается на вход стандартного регулятора частоты с передаточной функцией  $W_c(t)$ , формирующий управляющее воздействие  $u$ . Это воздействие и возмущающий сигнал  $v_s$  поступают в модель паровой турбины и изменяют вектор его состояния  $X_T$ . Координата частоты  $\phi$  ООС подается на сумматор и совместно с задающим воздействием  $\phi_s$  формирует сигнал ошибки  $\epsilon$  [8]. Входным возмущающим воздействием САУЧ является сигнал изменения мощности  $v_s$ , выходной переменной — частота паровой турбины  $\phi$ . На основании модели паровой турбины построены математические модели ее систем управления с различными регуляторами [9]. Для оптимизации параметров САУЧ сформируем вектор  $x$  из варьируемых параметров ПИД-регулятора частоты  $K_p$ ,  $\lambda_I$  и  $\lambda_D$ .

Определим модели САУЧ при входном возмущающем воздействии  $v_s = -1(t)$ , соответствующему переходу паровой турбины из режима номинальной мощности  $v = 0$  в режим холостого хода, и выходной координате  $y$  отклонения частоты в процентах:

$$\frac{dX_c(x,t)}{dt} = f(x, X_c(x,t), v_s), \quad y(x,t) = 100 \cdot C_c X_c(x,t),$$

где индекс  $C$  соответствует типу регулятора П, И, Д, ПИ, ПД, ИД или ПИД. САУЧ с И, Д и ИД-регуляторами частоты оказались неэффективными, так как их оптимальные процессы имеют отклонения частоты, превышающие 12 %. Результаты оптимизации модифицированными ГА векторной целевой функции представлены в таблице 2 и на рис. 5. Для статических САУЧ с П и

ПД регуляторами  $y(\infty) = 1,0$ , а для астатических САУЧ с ПИ и ПИД-регуляторами  $y(\infty) = 0$ . В первых четырех экспериментах принято допустимое значение размаха колебаний частоты  $\zeta_m = 1$ , а в последних двух  $\zeta_m = 0,5$ . Для  $N = 5$  задано время интегрирования  $T_f = 50$  с, а в остальных экспериментах  $T_f = 20$  с.

Во всех экспериментах оптимальное значение коэффициента пропорциональной составляющей ошибки  $K_p^*$  достигло значения верхнего ограничения  $b_i = 100$ , оптимальные значения  $\lambda_I^*$  и  $\lambda_D^*$  находятся внутри допустимой области изменения параметров. При сбросе нагрузки наилучшим типом регулятора частоты является ПИД-регулятор, обеспечивающий самый быстрый переходный процесс с наименьшим максимальным отклонением частоты и с самым быстрым восстановлением ее номинального значения.

Таблица 2

Результаты оптимизации САУЧ

$N$	$\lambda_I^*$	$\lambda_D^*$	$F_1^*$	$F_2^*$	$\sigma^*$	$\zeta^*$	$t_c^*, c$
1	—	—	20	2,0	3,6	3,0	3,56
2	27	—	22	0,3	3,5	1,0	5,19
3	—	1,1	21	1,7	3,5	2,7	3,16
4	31	1,1	23	0,2	3,4	0,8	3,50
5	10	—	22	0,4	3,6	0,5	19,42
6	23	1,1	23	0,3	3,4	0,5	5,04

На рис. 6 представлены изменения некоторых переменных состояния оптимальной САУЧ с ПИД-регулятором, полученные при входном ступенчатом воздействии  $v_s = -1(t)$ .

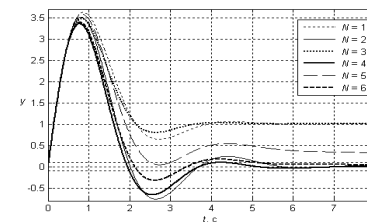


Рис. 5. Изменение частоты при различных регуляторах

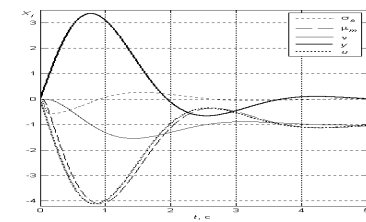


Рис. 6. Изменение переменных состояния в оптимальной САУЧ

Координата ОЗ  $\sigma_s(t)$  изменяется в небольших пределах и устанавливается в нулевое значение. Координата СМ  $\mu_m(t)$ , уменьшаясь, принимает значительные отрицательные значения и переходит к значению  $-1$ . Координата мощности турбины  $v(t)$  из начального нулевого значения номинальной мощности после нескольких быстро затухающих колебаний стремится к значению  $-1$ , соответствующему холостому ходу паровой турбины. Координата отклонения частоты  $y(t)$  из начального нулевого значения после затухающих колебаний возвращается на нулевой номинальный уровень. Сигнал ПИД-регулятора  $u(t)$  уменьшается, а затем после колебаний устанавливается на значении  $-1$ . Выходная координата электрогидравлического следящего привода  $\mu_m(t)$  повторяет с небольшим запаздыванием изменение сигнала регулятора частоты  $u(t)$ . Таким образом, в данной САУЧ с ПИД-регулятором электрогидравлический следящий привод и САУЧ удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям.

В отличие от рассмотренных регуляторов нечеткий ПИД-регулятор позволяет организовать более гибкое регулирование по ПИД закону с автоматическим вычислением настроек регулятора для объектов с пропорциональным исполнительным механизмом. Принцип действия НР отличается от классических тем, что на вход объекта, наряду с сигналом регулятора, подается дополнительный пробный синусоидальный сигнал малой амплитуды. По амплитуде и фазе гармонической составляющей в выходном сигнале объекта осуществляется расчет настроек регулятора.

Использование НР позволит лучше автоматизировать процесс настройки контуров регулирования, а также отказаться от использования обычных методов идентификации динамики объекта и расчета оптимальных параметров настройки регуляторов. Как показывает практика, адаптивные регуляторы позволяют экономить до 15% сырья и энергоресурсов по сравнению с ручным управлением или порядка 5% по сравнению с неоптимально настроенным классическим ПИД регулятором [2]. Кроме того, применение адаптивного регулирования ведет к сокращению сроков и стоимости пуско-наладочных работ.

Эффективное совмещение методов теории управления, теории нечетких множеств и нечеткой логики позволяет формировать модели сложно формализуемых процессов управления, а также обеспечивать формирование управляющих сигналов адекватно процессам принятия решений высококвалифицированным специалистом-экспертом [6,11].

Нечеткие системы особенно эффективны в сложных нелинейных процессах АЭС с параметрическими неопределенностями, для которых стандартные подходы синтеза САУ неприменимы. В то же время при синтезе нечетких регуляторов все чаще наблюдается совмещение принципов

нечеткой логики и традиционной теории управления. Применение такого подхода требует анализа устойчивости систем с нечеткими регуляторами.

**Выводы.** Из проведенных исследований вытекают следующие выводы.

1. На основании моделей электрогидравлического преобразователя, отсечного золотника, сервомотора и датчиков положения разработана математическая модель в пространстве состояний следящего привода паровой турбины с тремя датчиками. Оптимизация параметров этой модели обеспечивает высокое качество монотонного процесса в следящем приводе при оптимальном значении коэффициента усиления.

2. Разработаны математические модели систем стабилизации частоты вращения ротора паровой турбины в пространстве состояний с различными стандартными и нечеткими регуляторами частоты. С использованием модифицированных генетических алгоритмов решены задачи оптимизации прямых показателей качества для систем стабилизации частоты вращения. Самым эффективным стандартным типом регулятора частоты при сбросе нагрузки турбины является ПИД-регулятор, который обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс с наименьшим отклонением частоты. Проанализированы возможности нечетких ПИД-регуляторов.

3. Для оптимизации векторных целевых функций САУ модифицированы прямые методы безусловной минимизации и генетические алгоритмы, которые позволили найти оптимальные значения показателей.

Вычислительные эксперименты подтвердили высокую эффективность применения модифицированных методов.

**Список литературы:** 1. Фрагин М. С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшие перспективы. – СПб.: Энерготех, 2005. – 248 с. 2. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 12 с. 3. Nelder J. A., Mead R. A simplex method for function minimization, computer journal. – 1964. № 7, P. 308-313. 4. Сабанин В. Р., Смирнов Н. И., Репин А. И. Оптимизация настроечных параметров регулирующих устройств в АСУ // Сборник трудов конференции Control 2003. – МЭИ, 2003. с 144-148. 5. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search optimizations and machine learning. addison.wesly. – 1989. 6. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности // Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. Харьков, Основа, 1997. 112 с. 7. Кириллов И. И. Автоматическое регулирование паровых турбин и газотурбинных установок. Л.: Машиностроение, 1988. 447 с. 8. Трояновский Б. М. Паровые турбины. успехи, нерешенные проблемы // Теплоэнергетика. – 1983. № 1. С. 6-11. 9. Северин В. П. Моделі і методи оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоку атомної електростанції: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.13.07 / НТУ «ХП». Харків, 2007. 36 с. 10. Федянина К. Б., Кучер Е. А., Северин В. П. Оптимизация следящего привода и систем управления паровой турбиной с использованием генетических алгоритмов // Техн. електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2009. – Ч. 5. – С. 86-91. 11. Джафари Хенджани Сейед Моджтаба, Северин В. П., Чернай В. Ф. Перспективы применения генетических алгоритмов для синтеза интеллектуальных систем управления энергоблока атомной электростанции // Техн. електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2009. – Ч. 5. – С. 92-97.

Поступила в редакцию 30.10.09